

Sains Malaysiana 43(11)(2014): 1769–1774

**Elektrolit Dwi Lapisan $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.90}$ (SDC)/ $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ (YSB)
untuk Sel Fuel Oksida Pepejal Bersuhu Sederhana
($\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.90}$ (SDC)/ $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ (YSB) Bilayered Electrolytes
for Intermediate Solid Oxide Fuel Cells)**

DEDIKARNI PANUH, ANDANASTUTI MUCHTAR*, NORHAMIDI MUHAMAD, EDY HERIANTO MAJLAN
& WAN RAMLI WAN DAUD

ABSTRAK

Elektrolit dwi lapisan samarium terdop seria (SDC)/yttria terstabil bismut (YSB) dikaji adalah untuk menghasilkan sel fuel oksida pepejal bersuhu sederhana (IT-SOFC). Matlamat penyelidikan ialah mengkaji kesan suhu pengkalsinan terhadap penghasilan struktur elektrolit dwi lapisan SDC/YSB untuk IT-SOFC. Elektrolit dwi lapisan SDC dan YSB dihasilkan melalui kaedah sol-gel dan kaedah tindak balas keadaan pepejal. Serbuk SDC dikalsin pada suhu 800, 1000 dan 1200°C selama 5 jam dan serbuk YSB dikalsin pada suhu 550, 650 dan 750°C selama 2 jam. Analisis pembelauan sinar-X (XRD) mendapati serbuk SDC yang dihasilkan pada suhu 800-1200°C selama 5 jam mempunyai struktur $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.90}$, manakala YSB mempunyai struktur $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ pada suhu 750°C selama 2 jam. Peningkatan suhu pengkalsinan SDC pada suhu 800, 1000 dan 1200°C selama 5 jam menunjukkan peningkatan pada saiz hablur iaitu 42.4, 58.7 dan 79.9 nm. Peningkatan suhu pengkalsinan YSB sehingga suhu 750°C menyebabkan berlakunya perubahan struktur YSB daripada bentuk tetragon menjadi kiub fluorit dengan saiz hablur 28.86 nm. Hasil perbandingan ujian prestasi sel pada suhu pengoperasian sederhana (650°C), penggunaan elektrolit dwi lapisan (SDC/YSB) dengan suhu pengkalsinan SDC-1200°C dan YSB-750°C menghasilkan prestasi sel paling tinggi dengan ketumpatan kuasa 81.55 mW/cm² dan ketumpatan arus 225.36 mA/cm².

Kata kunci: Elektrolit dwi lapisan; komposit; pengkalsinan; sol-gel

ABSTRACT

Bilayered electrolytes samarium doped ceria (SDC)/yttria stabilised bismuth (YSB) were investigated to develop intermediate temperature of solid oxide fuel cells (IT-SOFCs). The aim of this study was to investigate the effects of the calcination on the microstructure of SDC/YSB bilayered electrolytes in IT-SOFC. Bilayered electrolytes SDC and YSB were synthesised via sol-gel and a solid state reaction method. The SDC powders were calcined at 800, 1000 and 1200°C for 5 h whereas YSB powders were calcined at 550, 650 and 750°C for 2 h. The result from XRD showed that the SDC powder having a $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ structure after the calcine at a temperature of 800 to 1200°C for 5 h and YSB having an $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ structure at 750°C for 2 h. An increase in the calcination temperature on the SDC at 800, 1000 and 1200°C for 5 h caused an increased in crystalline size to 42.4, 58.7 and 79.9 nm, respectively. An increase in YSB calcination temperature to 750°C resulted in the transformation of YSB from tetragonal into cubic fluorite structure with a crystallite size of 28.86 nm. By comparing the results of cell performance test in intermediate operation temperature (650°C), bilayered electrolytes (SDC/YSB) with the calcination temperature SDC-1200°C and YSB-750°C showed the highest cell performance with power density 81.55 mW/cm² and current density of 225.36 mA/cm².

Keywords: Bilayered electrolytes; calcination; composite; sol-gel

PENDAHULUAN

Sel fuel oksida pepejal (SOFC) adalah penjana kuasa alternatif yang berpotensi dikembangkan pada masa kini kerana mempunyai kecekapan yang tinggi, kebolehsuaian bahan api dan memberi kesan minimum kepada alam sekitar (Dedikarni et al. 2012; Noor Ashrina et al. 2009). Sel fuel oksida pepejal beroperasi pada julat suhu yang luas, iaitu daripada suhu 600-1000°C. Julat operasi yang tinggi ini memudahkan pemilihan bahan api sebagai bahan tindak balas dalam sel fuel oksida pepejal seperti H₂, gas semula jadi (CH₄ dengan bilangan hidrokarbon sedikit), alkohol dan karbon monoksida

hidrokarbon manakala oksigen pula digunakan sebagai pengoksida (Kakac et al. 2007; Prabhakar & Nguyen 2004).

Salah satu bahan yang telah digunakan dalam kajian secara mendalam dan digunakan oleh penyelidik terdahulu adalah YSZ dengan struktur kiub fluorit. YSZ sering digunakan dalam SOFC kerana memiliki gabungan sifat unik seperti kestabilan kimia dan rintangan terma yang tinggi dengan julat ketulenan kekonduksian ion yang baik (Will et al. 2000). Walau bagaimanapun, suhu operasi YSZ adalah tinggi iaitu pada julat 900-1000°C. Oleh itu, kos penghasilan SOFC telah meningkat

terutamanya untuk komponen tersaling hubung dan alat penukar haba (Badwal & Foger 1996). Namun begitu, terdapat juga beberapa permasalahan dengan penggunaan YSZ iaitu apabila beroperasi pada suhu rendah, peningkatan kerintangan elektrolit akan berlaku. Kerintangan yang tinggi boleh diatasi dengan pembuatan elektrolit yang nipis atau mencari bahan alternatif lain yang mempunyai kekonduksian ion yang tinggi seperti YSB, seria terdop oksida bismut, seria terdop samaria, seria terdop gandola dan scandia terdop zirkonia (Will et al. 2000). YSB adalah bahan yang memiliki banyak kelebihan berbanding bahan lain terutamanya daripada segi kestabilan dan peningkatan kekonduksian ion pada suhu rendah dan sederhana (Huang et al. 2008).

Berbanding dengan bahan elektrolit biasa seperti YSZ, elektrolit berasaskan seria memiliki kekonduksian ion yang baik pada suhu rendah. Elektrolit berasaskan seria seperti SDC memiliki kekonduksian ion sekali ganda berbanding dengan YSZ pada suhu 800°C. Elektrolit berasaskan zirkonia juga mempunyai kekonduksian elektrik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan elektrolit berasaskan oksida bismut dan seria pada suhu rendah dan sederhana. Oleh itu, penggantian elektrolit YSZ dengan elektrolit berasaskan seria adalah lebih baik kerana membolehkan penurunan suhu operasi SOFC daripada 1000 ke 500°C (Kharton et al. 2001).

Beberapa kebaikan penurunan suhu operasi SOFC pada suhu rendah dan sederhana adalah mudah dalam pemilihan bahan, proses pembuatan yang tidak rumit dengan kos yang rendah, peningkatan kecekapan dan jangka hayat sel yang lebih panjang. Penggantian bahan elektrolit berasaskan oksida zirkonia dengan bahan elektrolit berasaskan seria dan bismut akan menurunkan suhu operasi dan memberikan banyak kebaikan terhadap SOFC. Walau bagaimanapun, pada tekanan rendah separa oksigen, berlaku proses campuran kekonduksian ion dan elektron mengakibatkan penurunan elektron Ce^{4+} kepada Ce^{3+} pada seria terdop.

Pencampuran elektron dan ion pada elektrolit berasaskan seria akan menyebabkan lintar pintas dan penurunan prestasi sel (Zhang et al. 2011). Kelemahan oksida bismut pada tekanan separa oksigen boleh menyebabkan ketidakstabilan dan terjadi penguraian menjadi logam bismut (Zhang et al. 2011). Penguraian dan perubahan kestabilan oksida bismut akan menurunkan prestasi sel dan menyebabkan sel tidak cekap untuk beroperasi pada suhu di bawah 729°C dan suhu melebihi 824°C.

Walaupun bagaimanapun, kelemahan elektrolit berasaskan seria dan bismut boleh diatasi dengan membuat struktur elektrolit dwi lapisan yang mengandungi YSB dengan struktur $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ dan elektrolit SDC dengan struktur $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$. Lapisan YSB disalut di bahagian katod sebagai halangan kebaliran elektron daripada SDC dan lapisan SDC pula disalut di bahagian anod agar oksida bismut tidak berlaku penguraian dalam sel tunggal penuh ($NiO-SDC|Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}(SDC)/Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}(YSB)|Ag_2O_3-$

YSB) (Dedikarni et al. 2014). Penggunaan struktur ini dikatakan dapat mencegah berlakunya penguraian daripada bismut dan penurunan seria pada keadaan penurunan separa oksigen.

Oleh itu, kajian tentang elektrolit dwi lapisan bagi sel tunggal $NiO-SDC|SDC/YSB|Ag_2O_3-YSB$ dengan pembuatan lapisan elektrolit dwi lapisan dijangka menyumbang kepada peningkatan prestasi SOFC. Ujian prestasi SOFC meliputi peningkatan ketumpatan kuasa dan arus. Kejayaan pembuatan elektrolit dwi lapisan SDC/YSB dijangka akan meningkatkan prestasi sel butang tunggal SOFC.

BAHAN DAN KAEDAH

Serbuk samarium terdop seria ($Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.9}$, SDC) disediakan dengan menggunakan kaedah sol-gel (Boden et al. 2007). Berdasarkan pengiraan stoikiometri, sejumlah Serium (III) nitrat heksahidrat $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (99.99 %, Sigma Aldrich Sdn. Bhd) dan Samarium nitrat heksahidrat $Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (99.99 %, Sigma Aldrich Sdn. Bhd) dicampur dan dilarutkan dalam air suling. Serbuk pepejal asid sitrik berketulenan 99.9% (Sigma Aldrich Sdn. Bhd) ditambahkan ke dalam larutan pada nisbah molar ion logam dan asid sitrik iaitu 1:1.2. Seterusnya, larutan dikacau dan dipanaskan di atas plat panas pada suhu 70°C untuk membentuk gel. Gel kemudian dikeringkan di dalam ketuhar (Jeio Tech OF-026G) semalaman bagi proses pengeringan gel untuk membentuk serbuk kering. Kemudian, serbuk kering dihaluskan dan dikalsin dalam relau (Carbolite ELF 11/23) pada suhu 800, 1000 dan 1200°C.

Serbuk elektrolit YSB dihasilkan dengan menggunakan kaedah tindak balas keadaan pepejal. Serbuk oksida bismut (Bi_2O_3) dan oksida ytrium (Y_2O_3) dicampurkan dalam pengisar bebola (Fritsch Pulverisette 6) selama 24 jam. Medium etanol telah digunakan sebagai pelarut. Campuran yang terhasil dikeringkan dalam ketuhar selama 12 jam pada suhu 90 °C untuk menghilangkan medium pelarut. Seterusnya, serbuk dikalsin pada suhu 550, 650 dan 750°C selama 2 jam di dalam relau. Serbuk yang terhasil dicirikan dengan XRD untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap perubahan fasa serbuk.

Kesan suhu pengkalsinan atas perubahan fasa serbuk elektrolit dwi lapisan (SDC/YSB), dianalisis menggunakan pembelauan sinar-X (Bruker D8 Advance) dilakukan dengan pembelauan kuprum, ($Cu-K\alpha$; $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) yang beroperasi pada arus 40 mA dengan voltan 40 kV. Proses pembelauan dijalankan pada sudut imbasan 20°- 80° dengan halaju imbasan 2°C/min.

Ujian prestasi elektrolit dwi lapisan yang dihasilkan diuji dalam sebuah sel butang tunggal $NiO-SDC|SDC/YSB|Ag_2O_3-YSB$. $NiO-SDC$ diuji sebagai anod, SDC/YSB sebagai elektrolit dwi lapisan dan Ag_2O_3-YSB sebagai katod. Ujian prestasi sel butang tunggal menggunakan alat uji prestasi SOFC (*Chino Corporation, Japan*) dijalankan untuk mengetahui ketumpatan kuasa dan arus pada suhu rendah hingga sederhana (500, 550, 600 dan 650°C).

HASIL DAN PERBINCANGAN

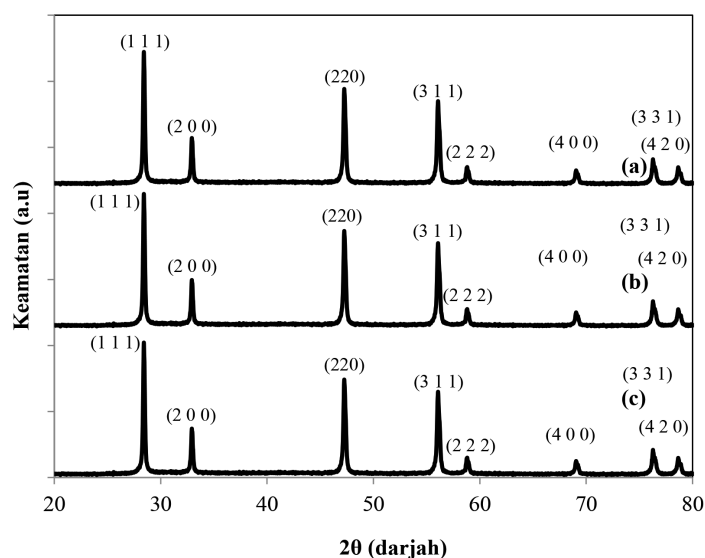
SDC telah dihasilkan menggunakan kaedah sol-gel. Penggunaan SDC untuk bahan asas dalam SOFC menggunakan kaedah sol-gel agar dapat menghasilkan serbuk berbentuk nano dengan struktur $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$. Serbuk berbentuk nano akan menghasilkan lapisan elektrolit yang lebih tumpat dengan keliangan yang rendah (Boden et al. 2007).

Bahan SDC yang telah dihasilkan melalui kaedah sol-gel pada suhu pengkalsinan 800, 1000 dan 1200°C selama 5 jam telah dicirikan menggunakan pembelauan sinar-X seperti ditunjukkan pada Rajah 1. Suhu kalsin yang pelbagai digunakan bagi mendapatkan serbuk SDC yang mempunyai saiz hablur berukuran nano yang sesuai dalam penghasilan substrat dan pelet sel tunggal SOFC. Rajah 1(a) menunjukkan spektrum pembelauan sinar-X terhadap serbuk SDC yang dikalsin pada suhu 800°C telah menghasilkan serbuk SDC dengan saiz hablur 42.4 nm. Spektrum pembelauan sinar-X terhadap pengkalsinan serbuk SDC pada suhu 1000°C seperti ditunjukkan pada Rajah 1(b). Pengkalsinan serbuk SDC pada suhu 1000°C selama 5 jam telah menghasilkan SDC dengan saiz hablur 58.7 nm. Serbuk SDC juga dikalsin pada suhu 1200°C selama 5 jam seperti ditunjukkan pada Rajah 1(c). Hasil pembelauan sinar-X pada serbuk SDC yang dikalsin pada suhu 1200°C selama 5 jam mendapati kandungan SDC dengan struktur $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ dengan saiz hablur 79.9 nm. Pengkalsinan SDC pada suhu 800, 1000 dan 1200 °C selama 5 jam telah berjaya menghasilkan SDC dengan struktur $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$. Hasil pembelauan sinar-X terhadap serbuk SDC memberikan spektrum bagi puncak keamatan pada sebatian yang terhasil. Bahan akhir yang terhasil selepas proses pengkalsinan serbuk SDC adalah tulen dan tiada kehadiran bahan asing dicerap pada puncak tersebut. Puncak yang dihasilkan adalah mengikut spektrum

berdasarkan data PDF: 01-075-0158 iaitu spektrum bagi sebatian SDC. Puncak spektrum pembelauan menunjukkan satah (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331) dan (420). Menurut laporan Srinivisan dan Bose (2010), serbuk SDC yang disediakan pada suhu pengkalsinan 800°C menggunakan kaedah hidrolisis semendakan terbantu boleh menghasilkan serbuk SDC dengan saiz hablur 12-16 nm. Kajian Karaca et al. (2010) pula menggunakan kaedah proses poliol dengan pendop 10-20% mol samarium serta suhu pengkalsinan 1000°C menghasilkan saiz hablur 31-42 nm. Walau bagaimanapun, penyediaan saiz hablur yang terlalu kecil akan menyebabkan masalah kerana sampel mudah pecah. Saiz hablur yang terlalu kecil juga menyebabkan kurangnya daya ikatan dan saling kunci antara zarah berkurangan dan cenderung untuk berpisah. Hasil pengukuran saiz hablur serbuk SDC bagi peningkatan suhu pengkalsinan menunjukkan peningkatan saiz hablur berlaku apabila suhu pengkalsinan ditingkatkan.

Hasil pembelauan sinar-X elektrolit YSB menggunakan kaedah tindak balas keadaan pepejal seperti ditunjukkan dalam Rajah 2. Rajah 2(a) menunjukkan hasil pembelauan sinar-X terhadap serbuk YSB yang dikalsin pada suhu 550°C selama 2 jam. Fasa YSB telah dikenalpasti menggunakan pembelauan sinar-X dengan spektrum sesuai dan fail data pembelauan serbuk (PDF) 00-041-0304, dengan fasa terhasil adalah tetragon. Penghasilan fasa tetragon adalah sesuai dengan jangkaan kerana pernah dilaporkan oleh Verkerk dan Burggraaf (1981).

Rajah 2(b) menunjukkan hasil pembelauan sinar-X terhadap serbuk YSB dikalsin pada suhu 650°C selama 2 jam. Fasa YSB telah dikenal pasti menggunakan pembelauan sinar-X dengan corak sesuai dengan fail data PDF 00-040-1021 dan fasa terhasil adalah rombohedron. Hasil pembelauan sinar-X pada YSB dengan suhu pengkalsinan 650°C selama 2 jam menyebabkan perubahan



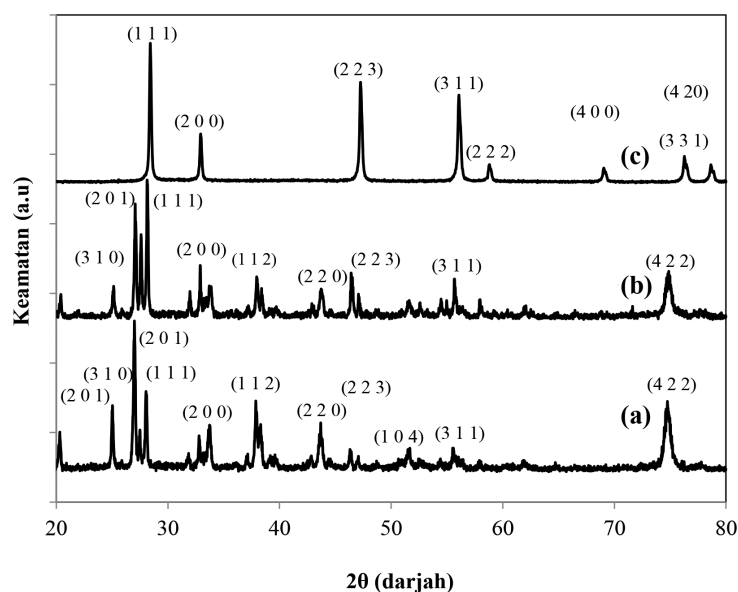
RAJAH 1. Sinar-X bagi serbuk elektrolit SDC setelah pengkalsinan pada suhu: 800°C, (b) 1000°C dan (c) 1200°C selama 5 jam

fasa bismut akibat peningkatan suhu pengkalsinan. Oksida bismut dengan fasa tetragon akan berubah kepada fasa rombohedral atau bercampur dengan fasa tetragon apabila dikalsin pada suhu 650°C selama 2 jam terutama untuk kandungan yttria yang melebihi 25% (Verkerk & Burggraaf 1981).

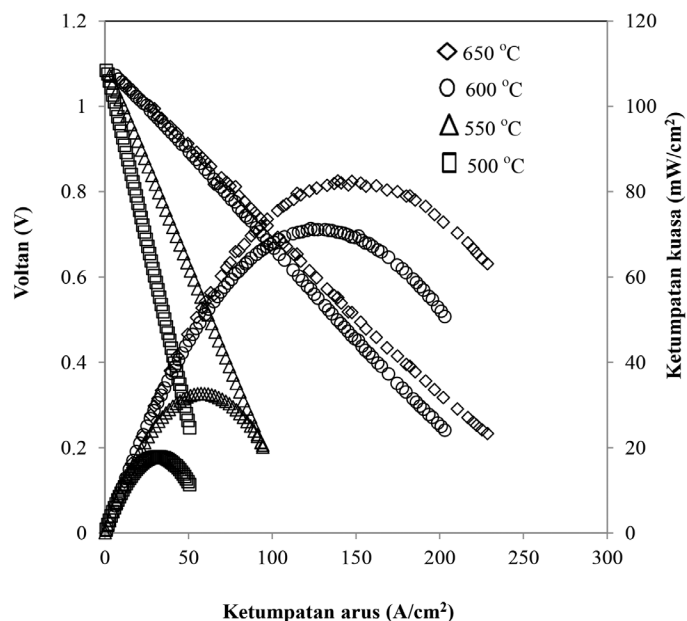
Rajah 2(c) menunjukkan hasil pembelauan sinar-X terhadap serbuk YSB dengan struktur $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ yang dikalsin pada suhu 750°C selama 2 jam. Fasa YSB telah dicerap dengan menggunakan pembelauan sinar-X serta spektrum yang sesuai dengan data PDF 01-084-1450, saiz hablur sebanyak 28.86 nm, struktur kiub fluorit dan kumpulan ruang Fm-3m (225). Selari dengan laporan Watanabe dan Kikuchi (1986), perubahan fasa rombohedral, monoklinik dan tetragon kepada fasa kiub fluorit tidak berlaku pada suhu di bawah 650°C kerana pada suhu ini Bi_2O_3 belum mencapai keseimbangan, perubahan fasa tetragon menjadi kiub fluorit hanya bermula pada suhu 720°C. Menurut laporan Watanabe dan Kikuchi (1986) fasa kiub fluorit oksida bismut akan terhasil apabila YSB dengan struktur $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ dikalsin pada julat 680 sehingga 830°C. Perubahan suhu pengkalsinan akan mengakibatkan perubahan fasa bismut. Sesuai dengan sifat oksida bismut yang senang berubah dengan perubahan suhu. Oksida bismut menunjukkan polimorfisme dan fasa-fasa α , β , γ , δ akibat daripada peningkatan suhu pengkalsinan (Harwig & Gerards 1978). Fasa kiub fluorit yang terhasil adalah fasa yang dikehendaki dalam penyelidikan ini kerana pembentukan fasa kiub fluorit pada bismut membuat bismut menjadi stabil dan memberikan kekonduksian yang maksimum. Perubahan fasa ini juga berlaku akibat pengisian tapak Bi^{+3} oleh ion Y^{+3} yang memiliki saiz ion yang lebih kecil berbanding Bi^{+3} .

Oleh itu, struktur $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ YSB dengan suhu pengkalsinan 750°C selama 2 jam telah digunakan dalam penyelidikan ini untuk menghasilkan elektrolit dwi lapisan kerana memiliki fasa kiub fluorit ($Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$) yang memberikan kestabilan bismut dan menghasilkan kekonduksian yang tinggi bagi sel. Selari dengan laporan Zhang et al. (2011) yang menyatakan $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ (YSB) mampu mencegah seria daripada mengalami penurunan dan menghalang kekonduksian elektron daripada merentasi elektrolit. Elektrolit $Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5}$ (YSB) juga digunakan untuk menghalang kekonduksian elektron daripada seria manakala lapisan nipis YSB berfungsi bagi menghasilkan kekonduksian yang tinggi di elektrolit. Lapisan SDC pula berfungsi sebagai penyokong YSB supaya lebih stabil dan kukuh (Zhang et al. 2010).

Rajah 3 menunjukkan hasil ujian prestasi keupayaan litar terbuka (OCP), ketumpatan arus (I) dan ketumpatan kuasa (P) sel tunggal pada suhu operasi 500, 550, 600 dan 650°C. Ketumpatan kuasa dan arus sel butang tunggal NiO-SDC|SDC/YSB| Ag_2O_3 -YSB adalah 18, 33, 71 dan 82 mW/cm² dan 46.7, 89.2, 195.7, 225.3 mA/cm² pada suhu operasi 500, 550, 600 dan 650°C. Sel butang tunggal NiO-SDC|SDC/YSB| Ag_2O_3 -YSB menggunakan elektrolit dwi lapisan (SDC/YSB) dengan suhu pengkalsinan 1200 dan 750°C ternyata mampu beroperasi pada suhu sederhana (650°C) dengan ketumpatan kuasa dan arus maksimum 82 mW/cm² dan 225.3 mA/cm². Kekonduksian elektrolit YSB meningkat lebih dua kali ganda daripada elektrolit SDC pada suhu 550-825°C (Inaba & Tagawa 1996). Pada masa yang sama, sel menunjukkan prestasi maksimum kerana SDC berjaya menghalang filem YSB daripada terdedah kepada penurunan oksigen dan menghindari daripada terhasilnya logam bismut yang memiliki sifat rintangan yang tinggi (Zhang et al. 2011).



RAJAH 2. Sinar-X bagi serbuk elektrolit YSB setelah pengkalsinan pada suhu: (a) 550°C, (b) 650°C dan (c) 750°C selama 2 jam



RAJAH 3. Prestasi ketumpatan kuasa dan arus sel butang tunggal NiO-SDC|SDC/YSB|Ag₂O₃-YSB dengan elektrolit dwi lapisan SDC/YSB

KESIMPULAN

Keputusan pembelauan sinar-X mendapati kaedah sol-gel dan kaedah tindak balas keadaan pepejal telah berjaya menghasilkan elektrolit dwi lapisan Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9} (SDC) dan Y_{0.25}Bi_{0.75}O_{1.5} (YSB). Imbasan pembelauan sinar-X mendapati bahawa pengkalsinan SDC pada suhu 1200°C selama 5 jam telah meningkatkan saiz hablur menjadi 79.9 nm. Peningkatan saiz hablur SDC telah mempermudah pembentukan serbuk SDC menjadi pelet. Peningkatan suhu pengkalsinan terhadap serbuk YSB sehingga suhu 750°C mendapati penjelmaan struktur YSB daripada rombohedron menjadi kiub fluorit dengan saiz hablur 28.86 nm. Penjelmaan fasa kiub fluorit pada YSB telah meningkatkan kestabilan dan kekonduksian bismut. Ujian prestasi terhadap lengkung keupayaan pada suhu operasi sederhana (650°C) mendapati ketumpatan kuasa dan arus maksimum iaitu 82 mW/cm² dan 225.3 mA/cm².

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pendidikan Malaysia atas tajaan melalui geran penyelidikan UKM-GUP-TK-08-17-324 dan UKM-OUP-TK-17-78/2008.

RUJUKAN

- Badwal, S.P.S. & Foger, K. 1996. Solid oxide electrolyte fuel cell review. *Ceramics International* 22: 257-265.
- Boden, A., Di, J., Lagergren, C., Linbergh, G. & Wang, C.Y. 2007. Conductivity of SDC and (Li/Na)₂CO₃ composite electrolytes in reducing and oxidising atmospheres. *Journal of Power Sources* 172: 520-529.
- Dedikarni, Andanastuti Muchtar, Norhamidi Muhamad, Edy Herianto Majlan & Wan Ramli Wan Daud. 2014. Fabrication

of thin Ag-YSB composite cathode film for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Composites Part B: Engineering* 58: 193-198.

- Dedikarni, Andanastuti Muchtar, Norhamidi Muhamad & Wan Ramli Wan Daud. 2012. Kesan rawatan haba terhadap mikrostruktur katod berliang Ag₂O₃-Bi₂O₃ di atas substratum keluli tahan karat yang disediakan dengan kaedah pengecatan sluri. *Sains Malaysiana* 41(1): 121-127.
- Harwig, H.A. & Gerards, A.G. 1978. Electrical properties of the α , β , and δ phases of bismuth sesquioxide. *Journal of Solid State Chemistry* 26: 265-274.
- Huang, H., Zhou, G. & Xie, Y. 2008. Electrochemical performances of Ag-(Bi₂O₃)_{0.75}(Y₂O₃)_{0.25} composite cathodes. *Journal of Alloys and Compounds* 464: 322-326.
- Inaba, H. & Tagawa, H. 1996. Ceria-based solid electrolytes. *Solid State Ionics* 83: 1-16.
- Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A. & Zhou, X.Y. 2007. A review of numerical modeling of solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 761-786.
- Karaca, T., Altınçekiç, T.G. & Öksüzömer, M.F. 2010. Synthesis of nanocrystalline samarium-doped CeO₂ (SDC) powders as a solid electrolyte by using a simple solvothermal route. *Ceramics International* 36: 1101-1107.
- Kharton, V.V., Fiugueiredo, F.M., Navarro, L., Naumovich, E.N., Kovalevsky, A.V., Yaremchenko, A.A., Viskup, A.P., Carneiro, A., Marques, M.B. & Frade, J.R. 2001. Ceria-based materials for solid oxide fuel cells. *Journal Materials Science* 36: 1105-1117.
- Noor Ashrina, A.H., Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud & Norhamidi Muhamad. 2009. Pencirian mikrostruktur katod La-Sr-Co-Fe-O bagi sel fuel oksida pejal bersuhu sederhana (IT-SOFC). *Sains Malaysiana* 38: 857-861.
- Prabhakar, S. & Nguyen, Q.M. 2004. Solid oxide fuel cells: Technology status. *International Journal Applied Ceramic Technology* 1: 5-15.
- Srinivasan, R. & Bose, A.C. 2010. Structural properties of Sm³⁺ doped cerium oxide nanorods synthesized by hydrolysis

- assisted co-precipitation method. *Materials Letters* 64: 1954-1956.
- Verkerk, M.J. & Burggraaf, A.J. 1981. High oxygen ion conduction in sintered oxides of the Bi_2O_3 - Dy_2O_3 system. *Journal of the Electrochemical Society* 128: 75-82.
- Watanabe, A. & Kikuchi, T. 1986. Cubic-hexagonal transformation of yttria stabilized δ -bismuth sesquioxide, $\text{Bi}_{2-2x}\text{Y}_{2x}\text{O}_3$ ($x=0.215$ - 0.235). *Solid State Ionics* 21: 287-291.
- Will, J., Mitterdorfer, A., Kleinlogel, C., Perednis, D. & Gauckler, L.J. 2000. Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics* 131: 79-96.
- Zhang, L., Li, L., Zhao, F., Chen, F. & Xia, C. 2011. $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}/\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ bilayered electrolytes for low-temperature SOFCs with Ag- $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ composite cathodes. *Solid State Ionics* 192: 557-560.
- Zhang, L., Xia, C., Zhao, F. & Chen, F. 2010. Thin film ceria-bismuth bilayer electrolytes for intermediate temperature solid oxide fuel cells with $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_{3-\delta}$ - $\text{Y}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.5}$ cathodes. *Materials Research Bulletin* 45: 603-608.

Institut Sel Fuel
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: muchtar@eng.ukm.my

Diserahkan: 22 November 2012
Diterima: 21 Julai 2014